

# STUDY ON ENERGY DIFFERENCE COMPENSATION FOR HIGH INTENSE MULTI-BUNCH ELECTRON BEAM GENERATED BY A PHOTOCATHODE RF-GUN\*

Yukihisa Yokoyama<sup>†A)</sup>, Junji Urakawa<sup>B)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>C)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>D)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>, Tatsuya Suzuki<sup>A)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>B)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>B)</sup>, Takayuki Yamamoto<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)  
3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup>Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University (RCEPS)  
1-2-1, Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

<sup>D)</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

## Abstract

At Waseda University, we have been studying a high quality electron beam generation and its application experiments with a Cs-Te photocathode RF-Gun. To generate more intense and stable electron beam, we have been developing the cathode irradiating UV laser which consists of optical fiber amplifier and LD pumped amplifier. As the result, more than 100 multi-bunch electron beam with 1nC each bunch charge was obtained. However, it has to be considered that the accelerating voltage will decrease because of the beam loading effect. So we have studied the RF amplitude modulation technique to compensate the bunch by bunch energy difference. The energy difference will be caused by transient accelerating voltage in RF-Gun cavity and beam loading effect. As the result of this compensation method, the energy difference has been compensated to 1% p-p, while 5% p-p without compensation. In this conference, we will report our multi-bunch electron beam linac system, the details of energy compensation method using the RF amplitude modulation and the results of beam experiment.

## フォトカソードRF電子銃を用いた大強度マルチバンチ電子ビームのバンチ毎エネルギー差補正に関する研究

### 1. はじめに

フォトカソードRF電子銃は、高輝度・短パルス・低エミッタンスが実現できる高品質電子源として期待され、世界各国で研究開発されている。早稲田大学では、ビーム利用の汎用化という観点から、より自由度のある小規模なテーブルトップサイズ (2m × 2.5m) で電子を相対論領域まで加速できる高品質電子ビーム源の開発と、その応用実験としてレーザーコンプトン散乱を用いた軟X線生成実験や放射線化学反応初期過程解明のためのパルスラジオリシス実験等を行っている<sup>[1][2]</sup>。

これまでの研究では、応用実験で要求されている電子ビームの大電流化のため、シングルバンチ運転から単位時間当たりのバンチ数を増やすマルチバンチ運転への切り替えを行っている<sup>[3]</sup>。また、マルチバンチ電子ビーム生成時に生じるバンチ毎のエネルギー差を補正するシステムや、バンチ毎のパラメータを測定する電子ビーム診断システムを構築している。しかし、得られた電荷量は、目標値である 800pC/bunch に到達できなかった。そこで、更なる高電荷量のマルチバンチ電子ビームを得るために、カソード照射用レーザーシステムの増幅部の改良に取り組んだ。

一方でマルチバンチ電子ビーム加速の場合、RF空胴内の電子ビーム加速過程においてRF電子銃空胴の過渡状態を用いることによる加速電圧差やビームローディング効果が原因となって、バンチ毎にエネルギー差が引き起こされる。我々はすでに、 $\Delta A$  Methodと呼ばれる、クライストロンへの入力RFパルスの振幅を変調し加速電圧の立ち上がりにフラットな領域を作り出す手法を採用し、バンチ毎エネルギー差の補正に成功しているが<sup>[3]</sup>、ビームローディング効果による加速電圧の低下は電荷量とバンチ間距離に依存するため、無視することができた。しかし、カソード照射用レーザーシステムの増幅部の改良によって電荷量が増大すると、ビームローディング効果による影響が無視できなくなることが予想される。そこで、 $\Delta A$  Methodを再検討し、RF空胴内における加速電圧の過渡的な立ち上がりとビームローディング効果による影響の双方を加味したビームエネルギー差補正システムを構築した。

本講演では、RF振幅変調を用いたエネルギー差補正システムとマルチバンチ電子ビーム診断結果、今後の計画について報告する。

### 2. カソード照射用レーザーシステム

我々のシステムでは、Pulrise-Vと呼ばれるNd:YLFモードロックレーザーから発生した119MHzのIRパル

\* Work supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (A) 10001690 and JST Quantum Beam Technology Program.

<sup>†</sup> trp-gill@asagi.waseda.jp

スレーザーを、パルストレイン切り出し部、増幅部、波長変換部の三つのパートによってパルストレイン状のUV レーザーに変換し、カソードに照射する。図1にカソード照射用レーザーシステムのフローチャートを示す。

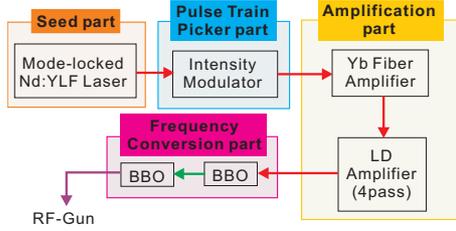


図1: カソード照射用レーザーシステムのフローチャート

パルストレイン切り出しには、ポッケルスセルの代わりにLN 光変調器を用いている。レーザーをファイバに収める必要があるが、高価な高圧電源などが不必要になるとともに、高圧スイッチのノイズの削減に有効である。またLN 光変調器ではシングルパルスの切り出しが可能であり、応用実験のニーズによって容易に切り替えることが可能である。

増幅部では、これまでのUV レーザーの強度揺れの原因として挙げられていたフラッシュランプ増幅装置を取り外して新たに光ファイバ増幅器システムを構築し、安定したレーザー増幅を得られた。光ファイバ増幅器にはコア励起 Yb ファイバを使用し、長さの異なるものを複数用意して最適なファイバ長を求めた<sup>[4]</sup>。前年度より用いていたLD 励起増幅装置は、3pass 光路から4pass 光路に組み替えて増幅装置を通過させる回数を増やすことにより、更なるゲインの増加を図った。その結果、光ファイバ増幅器で $\sim 10^2$ 倍、LD 励起増幅装置で $\sim 10^5$ 倍の増幅が得られ、波長変換前でのIR 強度は約 $40\mu\text{J/pulse}$ であった。図2にファイバシステム及びLD 励起増幅装置4pass システムを示す。LD4pass 光路にはLD の自己発振を抑えるため、アイソレータやアイリスを用いる等の工夫を施した。

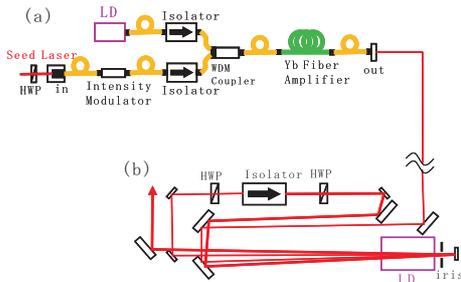


図2: (a) 光ファイバシステム及び (b) LD 励起増幅装置4pass システムの概観

波長変換部では、一つ目の非線形光学結晶で基本波である1047nmのIR光から波長523.5nm (Green)の第二高調波生成を、二つ目の非線形光学結晶でGreenから波長262nm (UV)の第四高調波生成をそれぞれ行っている。また、二つの非線形光学結晶通過後にはIR、Green、UVが混在して存在しているため、プリズムを用いて三つの光を分離し、それぞれを出力している。非線形光学結晶

にはBBO( $\text{BaB}_2\text{O}_4$ )結晶を用いており、UV レーザーの強度は全変換効率が10%程度の $4\mu\text{J/pulse}$ であった。

### 3. バンチ毎エネルギー差補正システム

マルチバンチ電子ビーム加速時に生じる問題として、バンチトレイン内にビームエネルギー差が生じてしまうことが挙げられる。エネルギー差が生じてしまう原因の一つに、加速電圧の遅い立ち上がり時間がある。RF 空洞のフィリングタイムが長いために空洞内の加速電圧が定常状態に達するまでに時間を要し、クライストロンRFパルス幅の最大値である $4\mu\text{s}$ を効率的に利用できず、図3(b)緑線のような過渡状態の電圧で電子ビームを加速させることになり、エネルギーに差が生じる原因となる。我々はそのエネルギー差の補正法として、 $\Delta A$  Method と呼ばれる、入射RFパルスに図3(a)青線のような振幅変調を行うことによって加速電圧にエネルギー的にフラットな領域を作り出す手法を採用している<sup>[5]</sup>。変調RFパルスは次式で与えられる。

$$P(t) = P_0 \frac{[1 - e^{-\frac{t}{t_f}}]^2}{[1 - e^{-\frac{t}{t_f}}]} \quad (1)$$

ここで $P_0$ は印加RFパワー、 $t_1$ は変調開始タイミング、 $t_f$ は空洞のフィリングタイムである。

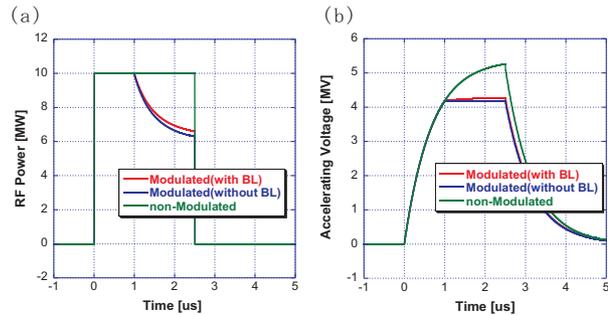


図3: (a) 印加RFパルスと (b) 空洞内加速電圧の計算

一方でエネルギー差が生じてしまう原因のもう一つに、ビームローディング効果による後方バンチの電圧降下がある。前年度では1バンチ当たりの電荷量が比較的少なく、バンチ間隔が8.4ns(119MHz)と長いため、ビームローディング効果による影響を無視することができた。しかしながら、カソード照射用レーザーシステムの増幅部の改良によって電荷量が増大すると、ビームローディング効果による影響を無視することができなくなることが予想される。すなわち、加速電圧の過渡的な上昇とビームローディング効果による電圧降下の双方を加味したエネルギー差補正が必要となる。

そこで我々は、 $\Delta T$  Method をRF振幅変調に応用する手法を検討した。 $\Delta T$  Method とは、あるタイミングでレーザーを入射することにより、そのタイミングでの加速電圧の過渡的な上昇とビームローディング効果の電圧降下を相殺させ、エネルギー的にフラットな領域を作り出す手法である<sup>[6]</sup>。1nC/bunchでのビームローディングロスと加速電圧への影響を図4に示す。レーザー入射タイミングが $2.5\mu\text{s}$ のときにエネルギーがフラットになることが見て取れる。しかしながら、我々のシステム

で  $\Delta T$  Method を用いると、クライストロンの印加 RF パルス幅に制限があるために加速可能なバンチ数には限界が生じてしまう。

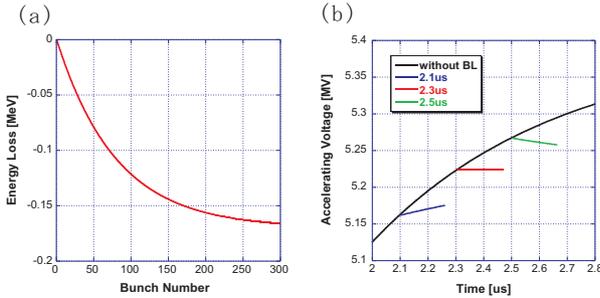


図 4: 1nC/bunch での (a) ビームローディングロスと (b) 加速電圧への影響

そこで、図 3(b) 赤線のように、 $\Delta T$  Method での入射タイミング以降の加速電圧の過渡状態を、 $\Delta A$  Method のフラットな領域に付け加えることで、ビームローディング効果を加味したエネルギー差補正が可能ではないかと考えた。変調 RF パルスの式は、 $\Delta T$  Method での入射タイミング  $t'$  を用いて以下のように計算された。

$$P(t)' = P_0 \frac{[1 - e^{-\frac{t_1}{t_f}} + e^{-\frac{t'}{t_f}} - e^{-\frac{t+t'-t_1}{t_f}}]^2}{[1 - e^{-\frac{t}{t_f}}]^2} \quad (2)$$

RF の振幅に変調を施すために、我々は図 5 のように RF 制御システムに振幅変調器を導入した。振幅変調器は、任意信号発生器で式 (2) を用いて任意作成した波形を変調波として、上流からの RF の振幅を変調して出力する。任意信号発生器は LabVIEW で操作することが可能であり、変調開始タイミング等各パラメータを自由に選択することができる。また、他の増幅器などの装置にはそれぞれ入出力特性が存在するので、各々のそれを測定し、その結果と要求している波形から変調波形を逆算した。印加 RF パルスと加速電圧の波形観測結果を図 6 に示す。RF ピックアップポートの空洞とのカップリングが小さいためにノイズの影響を大きく受けているが、約  $1.5\mu s$  のフラットな領域を作り出すことに成功したことが確認できる。

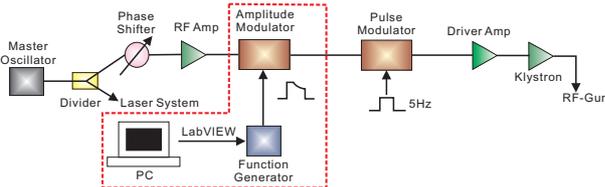


図 5: RF 制御システム

#### 4. 電子ビームパラメータ測定

以前のビームラインで用いていた電荷量測定用のファラデーカップやエネルギー測定用のスクリーンでは、マルチバンチ電子ビームのバンチ毎のパラメータを測定

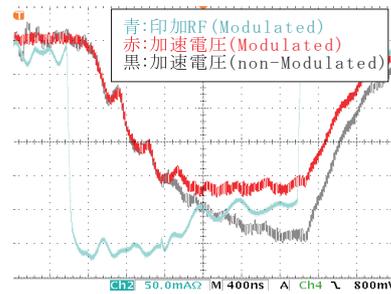


図 6: 印加 RF パルスと加速電圧の波形観測結果

することは可能ではなかった。そこで FCT (Fast Current Transformer) や BPM (Beam Position Monitor) をビームラインに導入することによって、それを可能にした。ビームラインの概観を図 7 に示す。FCT でバンチ毎の電荷量を、BPM と偏向電磁石でバンチ毎のエネルギーを、それぞれ測定する。また、ビームの電荷量とエネルギーを非破壊的に測定することができるため、ビーム利用の際にも常時モニターすることができるようになった。

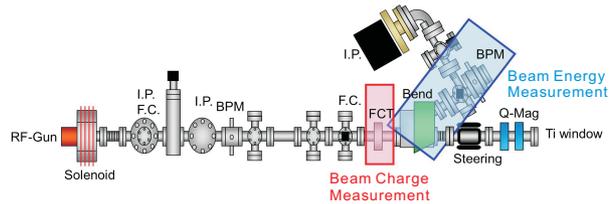


図 7: ビームラインの概観

バンチ毎の電荷量測定結果を図 8 に示す。レーザー増幅システムの改良の恩恵により、前年度の約 15 倍である 1nC/bunch 以上のマルチバンチ電子ビームが得られ、目標値である 800pC/bunch を達成した。カソードの量子効率率は 0.2% と算出された。

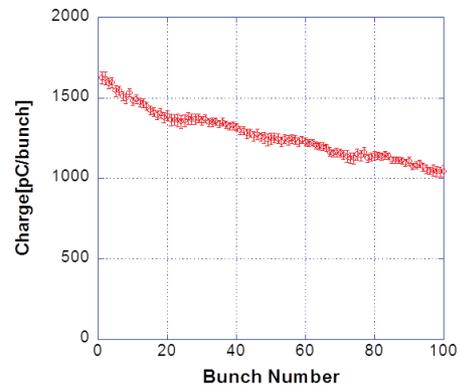


図 8: バンチ毎の電荷量測定結果

バンチ毎のエネルギー測定結果を図 9 に示す。図 8 の結果を考慮しビームローディング効果を加味して変調したものの (図 9 赤線)、ビームローディング効果を無視し加速電圧がフラットな領域を作るように変調したものの (図 9 青線)、変調しないもの (図 9 緑線) の三つを測定した。エネルギー差はそれぞれ順に、1.1%  $p-p$ 、4.2%  $p-p$ 、5.1%  $p-p$  であった。すなわち、フィリングタイムが遅

いことによる加速電圧の過渡的な上昇とビームローディング効果による電圧降下の双方を加味したRF振幅変調を行うことにより、バンチ毎エネルギー差の補正に成功したといえる。変調波形を自由に変えることが可能であるため、電荷量の大きさや本システムと異なる繰り返しマルチバンチ電子ビームにも柔軟に適用が可能である。

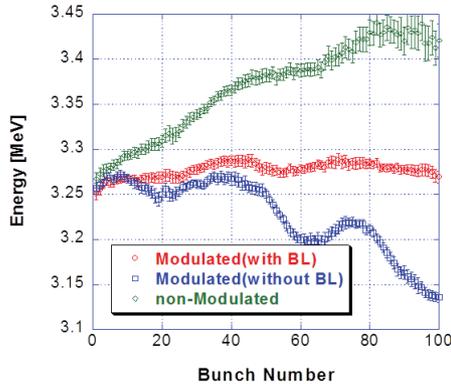


図9: バンチ毎のエネルギー測定結果

また、エネルギーがバンチトレイン内で波打ってしまう現象が、特に  $\Delta A$  Method を用いた結果に顕著にみられた。これは、振幅変調をすることによりRF増幅において飽和状態を用いることができないため、RF制御システム上流でRFノイズが乗った波形がそのまま増幅、空胴に印加してしまうことにより、加速電圧に影響を及ぼしてしまったこと、さらに測定時にRFノイズが乗ってしまったことが原因だと考えられる。そのため、今後行われる予定であるクライストロンのノイズ低減作業により、1%  $p-p$  以下のバンチ毎エネルギー差を得られることが見込まれる。

## 5. まとめと今後の予定

カソード照射用レーザーシステムに光ファイバ増幅器システムとLD励起増幅装置4passシステムを構築し十分な増幅を得たことによって、前年度の約15倍である1nC/bunch以上の安定したマルチバンチ電子ビームを得られた。また、電荷量の増大によりビームローディング効果の影響が無視できなくなったため、これを加味したRF振幅変調を行い、バンチ毎エネルギー差を1.1%  $p-p$  に抑えることに成功した。今後は、加速可能なバンチ数を増やすため、119MHzより高い繰り返し周波数のカソード照射用レーザーシステムを外部共振器を用いて構築する予定である。

## 参考文献

- [1] 坂上和之他, "早稲田大学フォトカソードRF電子銃における応用研究の現状と今後の展望", 第7回日本加速器学会年会, THPS105, 2010.
- [2] 別當良介他, "SC分析光を用いたピコ秒パルスラジオリスシステム構築", 本研究会, MOPS144.
- [3] Y.Yokoyama et al., "Multi-bunch Electron Beam Generation based on Cs-Te Photocathode RF-Gun at Waseda University", Proceedings of IPAC'10, pp.4119-4121, 2010

- [4] 横山悠久他, "早稲田大学におけるCs-TeフォトカソードRF電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム生成システムの開発", 第7回日本加速器学会年会, WEPS092, 2010.
- [5] S.Kashiwagi et al., "Beam Loading Compensation Using Phase to Amplitude Modulation Method in ATF", Proceedings of LINAC'98, pp.91-93, 1998.
- [6] K.Hirano et al., "High-intensity Multi-bunch Beam Generation by a Photo-cathode RF Gun", Nucl. Instr. and Meth. A 560, 2006.